

**CONSTRUCCIÓN DE UN LABORATORIO REMOTO PARA LA  
ENSEÑANZA DE FÍSICA**

Víctor Eduardo Vélez Vargas

Proyecto de grado presentado como requisito parcial  
para aspirar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Ing Andrés F. Calvo S, M.Sc

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
PEREIRA**

**2018**



Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Director

Pereira, 06 de abril de 2018



## *Agradecimientos*

Agradezco a todas las personas que me han acompañado a lo largo de estos más de 5 años, nada de esto hubiese sido posible sin cada uno de ustedes.



# CONTENIDO

	pág.
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA . . . . .	11
1.2. JUSTIFICACIÓN . . . . .	13
1.3. OBJETIVOS . . . . .	14
1.3.1. Objetivo General . . . . .	14
1.3.2. Objetivos Específicos . . . . .	15
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>17</b>
<b>3. MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>21</b>
3.1. Sensor . . . . .	21
3.2. Actuador . . . . .	21
3.3. Fuerzas físicas . . . . .	21
3.3.1. Peso . . . . .	21
3.3.2. Normal . . . . .	22
3.3.3. Fuerza fricción . . . . .	22
3.4. Segunda Ley de Newton . . . . .	23
3.5. Pseudo Inversa de Moore-Penrose . . . . .	23
3.6. Error Cuadrático Medio (RMS) . . . . .	25
<b>4. MARCO TEÓRICO</b>	<b>27</b>
4.1. Experimento Plano Inclinado . . . . .	27
4.2. Experimento Péndulo Simple . . . . .	29

<b>5. DISEÑO METODOLÓGICO</b>	<b>33</b>
5.1. Diseño Módulo Plano Inclinado . . . . .	33
5.1.1. Etapa de inicialización . . . . .	35
5.1.2. Etapa de adquisición y control . . . . .	36
5.1.3. Etapa de procesamiento de señales . . . . .	39
5.1.4. Etapa de filtrado de datos . . . . .	41
5.1.5. Etapa de envío de datos . . . . .	42
5.1.6. Etapa de visualización . . . . .	43
5.2. Diseño Módulo Péndulo Simple . . . . .	45
5.2.1. Etapa de inicialización . . . . .	46
5.2.2. Etapa de adquisición y control . . . . .	47
5.2.3. Etapa de procesamiento de señales . . . . .	49
5.2.4. Etapa de envío de datos . . . . .	49
5.2.5. Etapa de visualización . . . . .	50
<b>6. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS</b>	<b>53</b>
6.1. Experimentos y Resultados del Módulo Plano Inclinado . . . . .	53
6.2. Experimentos y Resultados del Módulo Péndulo Físico . . . . .	54
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>57</b>
7.1. TRABAJOS FUTUROS . . . . .	58
<b>8. ANEXOS</b>	<b>59</b>
8.1. Anexo A. Arduino Vs. BeagleBone Black: Una Comparativa . . . . .	59
8.2. Anexo B: Prototipos finalizados . . . . .	60



## LISTA DE TABLAS

1.	Coefficientes de fricción. . . . .	23
2.	Resultados obtenidos. . . . .	53
3.	Resultados obtenidos con Factor de Ajuste Proporcional. . . . .	54
4.	Error RMS. . . . .	54
5.	Resultados teóricos obtenidos. . . . .	55
6.	Error RMS. . . . .	55



## LISTA DE FIGURAS

1.	Esquema movimiento de cuerpo en plano inclinado. . . . .	27
2.	Diagrama de cuerpo libre. . . . .	27
3.	El péndulo. . . . .	30
4.	Diagrama cuerpo libre péndulo simple. . . . .	30
5.	Modelo de bloques. . . . .	33
6.	Diagrama de flujo. . . . .	34
7.	Punto de partida. . . . .	35
8.	Servomotor. . . . .	36
9.	Motor DC con caja reductora. . . . .	36
10.	Puente H BTS7960. . . . .	37
11.	Final de carrera o sensor de contacto. . . . .	37
12.	Ubicación parcial de sensores y actuadores. . . . .	38
13.	Sensor ultrasonido HC-SR04. . . . .	38
14.	Esquema final del sistema con sensores y actuadores. . . . .	39
15.	Diagrama de bloques de Etapa de Procesamiento de Señales. . . . .	39
16.	Arduino Mega 2560. . . . .	40
17.	Shell Ethernet Arduino. . . . .	41
18.	Esquema completo del sistema. . . . .	41
19.	Filtro de mediana. . . . .	42
20.	Base de datos MySQL. . . . .	43
21.	Index Plano Inclinado. . . . .	44
22.	Página de visualización. . . . .	44

23.	Tablas de resultados. . . . .	45
24.	Diagrama de flujo. . . . .	46
25.	Punto de partida. . . . .	47
26.	Sensor infrarrojo. . . . .	47
27.	Esquema final del sistema con sensores y actuadores. . . . .	48
28.	Diagrama de bloques etapa de procesamiento de señales. . . . .	49
29.	Base de datos MySQL. . . . .	50
30.	Index Péndulo Simple. . . . .	50
32.	Tablas de resultados. . . . .	51
31.	Página de visualización. . . . .	51
33.	Prototipo finalizado del módulo plano inclinado. . . . .	60
34.	Prototipo finalizado del módulo plano inclinado. . . . .	60

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La importancia de los laboratorios en la enseñanza de las ciencias, la investigación y la innovación es sin duda alguna, indiscutible. El trabajo práctico desarrollado en un laboratorio proporciona la experimentación y el descubrimiento que ayuda a complementar la formación teórica [1].

Los laboratorios prácticos, son considerados una infraestructura indispensable en las instituciones educativas para su trabajo de formación. La infraestructura escolar es analizada como un factor asociado a la cobertura escolar. En el caso particular de Colombia, la educación se divide en tres niveles, primaria, secundaria y terciaria, como en casi todos los países del mundo.

La educación media se concentra en gran parte, en instituciones de educación pública, sin embargo la educación de calidad se concentra en la educación privada, la cual es asequible a estratos altos. Solo el 1% de los colegios públicos en Colombia es considerado de nivel superior, mientras que el 16% de los colegios privados se encuentran en esta categoría [2]. Entre los factores que inciden en el rendimiento está el hacinamiento, la falta de docentes, la infraestructura deficiente, la carencia de laboratorios, ayudas educativas, bibliotecas, el acceso a las TIC, entre otras [2].

Con casi la mitad de la población pobre, los colombianos se educan en el sistema público, que está plagado de deficiencias en el servicio. Según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), la calidad de la infraestructura escolar podría influir de manera significativa en el aprendizaje de los estudiantes [3].

Entonces el aumento de estudiantes, la crisis económica actual, la deficiente infraestructura de los planteles educativos, los altos costos de los equipos de laboratorio y la necesidad de complementar el conocimiento teórico de algunas asignaturas con conocimiento práctico en la enseñanza media evidencian la necesidad de la implementación de diferentes laboratorios en

áreas de las ciencias básicas[4, 5, 2].

Además de la problemática anterior, el Plan de Nacional de Desarrollo en sus artículos 39, 46, 194 y 195, insta a intensificar el uso de la infraestructura ya existente, priorizando el desarrollo de contenidos y aplicaciones para cuatro áreas de manera prioritaria, destacando entre ellas, la educación; para hacer uso de las TIC (Tecnologías de la Informática y la Comunicación) como herramientas necesarias en desarrollo de las competencias establecidas en Plan de Educación Nacional [6].

Según el gobierno actual de Juan Manuel Santos, “las TIC constituyen la apuesta más firme del Gobierno para impulsar el desarrollo del país, y la educación no es un caso aparte” [7]. A través de esta estrategia, el gobierno apuesta hacer más accesible la educación a todos los niños y mejorar los malos resultados obtenidos en pruebas como las PISA, donde quedó en los últimos puestos [7].

Entonces, dadas las necesidades nombradas anteriormente y evidenciadas las deficiencias en infraestructura, un laboratorio remoto constituye una solución sólida a la situación actual de los planteles educativos [4, 2, 5]. Ya que estas instituciones en la gran mayoría de los casos no cuentan con los recursos económicos necesarios para dotar sus planteles de laboratorios para la enseñanza de las ciencias básicas.

Entonces un laboratorio remoto se define como “una aplicación basada en un entorno cliente – servidor, donde los clientes (estudiantes o investigadores desde un sitio remoto), solicitan servicios o contactan a un servidor (equipo de cómputo, software de acceso, dispositivos a manipular), a través de distintos medios de interconexión (Intranet, Internet)” [8]. Este tipo de enfoque remoto, facilita la optimización del uso de la infraestructura debido a que puede ser utilizando por diferentes instituciones y solo requiere la implementación de un sólo laboratorio.

Actualmente en el país no existe ni una metodología o infraestructura sólida que permita el desarrollo de prácticas remotas; hasta el momento los mayores acercamientos que se tienen son el uso de laboratorios virtuales basados en simulaciones de fenómenos físicos, los cuales aunque permiten un acercamiento del estudiante al concepto, no generan un ambiente de realismo [9].

Existen diferentes proyectos e instituciones consolidados para desarrollo de estos laboratorios, como lo son: Physi-Lab [9], Laboratorio remoto para la enseñanza de robótica [10], entre otros. Aunque muchos de estos proyectos dan una solución aceptable a la problemática, la mayoría son artículos y metodologías que se quedan en el papel y no han sido implementadas. Otras soluciones basan sus plataformas en software licenciados de alto costo que reducen la posibilidad de su implementación [10] y los pocos que pueden ser proyectos consolidados [9] no tendrían la capacidad necesaria para atender la cantidad de instituciones que requieren de estos servicios.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

El uso de laboratorios en la enseñanza de las ciencias básicas es de vital importancia [1], sin embargo el aumento en la población estudiantil, las condiciones socio económicas del país, la falta infraestructura de los planteles educativos y la necesidad de complementar la enseñanza con el conocimiento práctico, evidencian la necesidad del uso laboratorios en instituciones de educación, por lo que los laboratorio remotos constituyen una solución sólida a la situación actual de los planteles educativos, presentando ventajas en la optimización y uso adecuados de los mismos.

Los laboratorios remotos presentan grandes ventajas en cuanto a disponibilidad de tiempo, accesibilidad a través de internet, incentivos del gobierno para el uso de TICs, desarrollo de prácticas reales, entre otros. Entre estas ventajas cabe resaltar los altos estímulo y los incentivos que el gobierno de turno está dando para propagar el uso de estas herramientas. Otras de sus ventajas con respecto a laboratorios simulados o virtuales es que ofrecen, como son el acercamiento del estudiante a los diferentes experimentos, sin perder factores reales como puede ser el error encontrado al comparar los datos teóricos con los prácticos. En [11] enlistan una serie de ventajas que poseen los laboratorios remotos, entre las más destacables se encuentran que no es necesario que el alumno cuente con un software específico de simulación, dado que el único software con el que debe contar está almacenado en un servidor, y este se actualiza automática y periódicamente. Otra ventaja es que todos los implementos necesarios

para realizar el correcto procedimiento durante la práctica, se encuentra condensado solo en un ordenador, este hecho no limita el aprendizaje del alumno, ya que los elementos usados son reales y poseen sus parámetros intrínsecos, como son su tolerancia e incertidumbre.

Aunque existen diferentes proyectos para el desarrollo de estos laboratorios [10, 9]. Estos proyectos son diseños, metodologías donde su implementación requiere de un alto costo o actualmente no se han implementado. Además los laboratorios constituidos no tienen la capacidad para suplir la demanda que en un futuro las instituciones de educación solicitarían. La gran proliferación en sistemas electrónicos, avances en ciencias de la computación, entre otras áreas, ha permitido desarrollar aplicaciones que anteriormente no eran posibles implementar o que requerían de un gran costo para su implementación. La actual electrónica y el uso de sistemas embebidos de bajo costo constituyen una plataforma segura para la implementación de técnicas avanzadas de instrumentación y procesamiento de señal necesarias en este tipo aplicaciones. Además la masificación y mejoramiento del servicio de internet en el país generan las condiciones adecuadas para el desarrollo de este tipo de aplicaciones.

Las ideas anteriormente nombradas generan una gran oportunidad para el diseño e implementación de un laboratorio remoto de ciencias básicas, para efectos de este proyecto de física mecánica, se tiene la posibilidad de brindar un marco de trabajo para la enseñanza de esta materia, con el mayor acercamiento a un experimento real ayudando a mejorar la calidad de enseñanza en la educación media del país y alineándose correctamente con algunas de las metas y objetivos del Plan de Desarrollo de Nacional de Colombia.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Construir un laboratorio remoto para la enseñanza de física, desarrollando dos módulos experimentales.



### **1.3.2. Objetivos Específicos**

1. Determinar los módulos experimentales de física a implementar en el laboratorio remoto.
2. Establecer los requerimientos técnicos de los módulos experimentales de física.
3. Diseñar y construir los módulos experimentales de física.
4. Definir una interfaz gráfica para el manejo de cada uno de los módulos experimentales de física y establecer el sistema cliente servidor del laboratorio remoto.
5. Verificar el funcionamiento de cada uno de los módulos experimentales de física controlado de forma remota.
6. Elaborar una guía y manual de instalación para cada uno de los laboratorios.



## 2. ESTADO DEL ARTE

Un laboratorio remoto es considerado una herramienta de gran importancia por sus ventajas espaciales, económicas y educacionales. Estas últimas son de vital importancia para mejorar las técnicas docentes tradicionales. Por un lado, el docente puede explicar y mostrar al estudiante cómo hacer la práctica pero debido a que “existe un gran número de estudios de psicología cognitiva que demuestran que las personas adquieren mejor el conocimiento haciendo cosas y reflexionando sobre las consecuencias de sus acciones que mirando o escuchando a alguien que les cuenta lo que deben aprender” [12], se puede permitir al estudiante realizar la práctica por si solo desde la comodidad de su casa, y sin disponer de un límite de tiempo y ni supervisión.

Los laboratorios remotos son una idea que se remonta al siglo pasado y vio sus orígenes en proyectos estadounidenses como el proyecto Collaboratories (1996). Posteriormente se expanden por las universidades de Oregon y Tennessee. En estos, contaron con equipos como telescopios astronómicos, aceleradores, aceleradores de partículas entre otros elementos, para el Collaboratories; y equipos de robótica para el caso de las universidades. Posteriormente, se implementan laboratorios remotos de óptica, mecatrónica, microelectrónica y manejo de transistores bipolares; en la universidades de Stanford, Brooklyn (2000), el MIT y la Distrital Francisco José de Caldas (1991), respectivamente [11].

En la Universidad Nacional del Litoral, en 2005, se desarrolló la implementación de un laboratorio remoto, con diferentes experimentos, entre los que se encuentran circuitos eléctricos en estado transitorio (circuitos resistivos capacitivos, resistivos inductivos y resistivos inductivos capacitivos), campo magnético dentro y fuera de un solenoide no ideal y volante sobre un plano inclinado [13].

En la Universidad Nacional de Educación a Distancia se estudió el campo magnético en bobinas y solenoides haciendo uso de un laboratorio remoto y un laboratorio virtual de electromagnetismo [14].

También, una coalición conformada por cuatro universidades colombianas (Universidad Tecnológica de Colombia, Universidad Católica de Pereira, Universidad Católica de Manizales y

la Universidad de Medellín) creó, en 2010, un laboratorio remoto donde se pueden llevar a cabo prácticas de física básica, como son Movimiento Rectilíneo Uniforme, Movimiento Uniformemente Acelerado, Caída de los Cuerpos y Conservación de la Energía [15].

En la Universidad Militar Nueva Granada se implementa un laboratorio remoto de automatización industrial cuyo objetivo es permitir a los estudiantes de diversas ingenierías acercarse a equipos reales que son inasequibles económicamente para la universidad [16].

En la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales se lleva a cabo la implementación de laboratorios remotos de física general mediante el uso de equipos PASCO. En este, se propone el uso del laboratorio remoto tanto para estudiantes de carreras afines a la ingeniería como para estudiantes que se encuentren cursando algún grado de la educación media [17].

En la Universidad de León (España), se desarrolla un laboratorio remoto para la enseñanza de la automática, donde se pueden realizar experimentos referentes al manejo de PIDs, cerrar el lazo e introducir un regulador P, introducir una perturbación de tipo escalón en la electroválvula de desagüe y observar cómo se comporta el sistema y los distintos reguladores, entre otros [18].

Otro proyecto es el e-Laboratory Project, este pertenece a la Facultad de Matemáticas y Física de la Universidad de Carolina de Praga en la República Checa y fue desarrollado en 2002. Este proyecto cuenta además con el apoyo de la Universidad Tamas Bata y la Universidad de Trnav, quienes colaboraron con el diseño experimental y la pedagogía del experimento. Actualmente, este proyecto cuenta con 18 prácticas, entre las que se encuentran principio de Heisemberg, polarización de la luz, el experimento de Frank-Hertz, la medición de la constante de Plank.

RemLabNet es un sistema que permite realizar experimentos de forma remota, orientado a niveles de educación media y de pregrado universitario. Entre los experimentos disponibles en este proyecto están caída libre, plano inclinado, péndulo simple y el principio de Arquímedes.

Innovative education es un proyecto desarrollado, aproximadamente desde hace dos años, en la ciudad de Pereira. Este cuenta con laboratorios virtuales donde se encuentran disponibles experimentos en áreas tales como ciencias básicas, mecánica, electricidad, electrónica,

telecomunicaciones, entre otras. Actualmente, se encuentra en proceso el desarrollo de la implementación de laboratorios remotos.

WebLab-Deusto es un proyecto desde hace 9 años en la Universidad de Deusto. Este ofrece sus prácticas en 10 idiomas diferentes y son accesibles desde dispositivos móviles; además dispone de prácticas orientadas a la educación básica primaria. Entre los experimentos ofrecidos por este están programación de un robot y circuitos electrónicos [11].

En 2013, en la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina), se presentó como método de enseñanza e investigación un laboratorio remoto con énfasis en Administración de Redes [19], donde los usuarios pueden incluir en sus prácticas comandos y códigos desarrollados por ellos mismos, supliendo el idealismo de los programas de simulación.

En el Instituto Superior de Ingeniería de Porto (2016), se crearon módulos educativos para el desarrollo de prácticas de circuitos eléctricos y electrónicos, con el fin de acercar a los estudiantes de diferentes ingenierías a las magnitudes eléctricas y observar su error con respecto a los cálculos teóricos [20].



### 3. MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se exponen los conceptos necesarios para el entendimiento del trabajo presentado. Estos conceptos están relacionados con los elementos usados, magnitudes físicas y operaciones matemáticas fundamentales para el correcto funcionamiento de los módulos propuestos.

#### 3.1. Sensor

Un sensor es un dispositivo que proporciona una señal eléctrica a partir de la transducción de una magnitud física o química medida; tomando ventaja de las características eléctricas de la materia [21]. En sistemas de control e instrumentación, este dispositivo es de fundamental importancia, pues generalmente se considera parte de las entradas de los mismos y es su labor obtener información acerca de las variables físicas que se desean controlar.

#### 3.2. Actuador

Un actuador, anteriormente conocido como transductor de salida, es un dispositivo que permite la conversión de energía. A pesar de su similitud con la definición de sensor (subsección 3.1), se debe tener en cuenta que el objetivo principal de un sensor es obtener información, mientras que el de un actuador es meramente la conversión de la energía [22].

#### 3.3. Fuerzas físicas

##### 3.3.1. Peso

Se denomina Peso a la fuerza de atracción gravitacional que ejerce el planeta Tierra sobre un cuerpo determinado, y está dada por multiplicación de la aceleración de la gravedad ( $9,8 \frac{m}{s^2}$ ) por la masa del mismo [23].

### 3.3.2. Normal

La Fuerza Normal es aquella que ejerce una superficie sobre cualquier objeto que se pose sobre ella. En todos los casos, esta fuerza será perpendicular a la superficie [24].

### 3.3.3. Fuerza fricción

La fuerza de fricción es definida como la oposición del entorno en el que se mueve un objeto a dicho movimiento [23]. Existen dos tipos de fuerzas de fricción, la primera es llamada Fuerza de Fricción Estática y está dada por la ecuación 1

$$\vec{f}_s \leq \mu_s n \quad (1)$$

donde,

- $\mu_s$  es el coeficiente de fricción estática.
- $n$  es la magnitud de la fuerza normal.

La segunda es llamada Fuerza de Fricción Cinética y está dada por la ecuación 2

$$\vec{f}_k = \mu_k n \quad (2)$$

donde,

- $\mu_k$  es el coeficiente de fricción cinética.
- $n$  es la magnitud de la fuerza normal.

Dado que las superficies que se usan en este proyecto de grado están hechas de teflón, es pertinente ambos coeficientes de fricción.



Coeficientes de fricción para el teflón	
$\mu_s$	$\mu_k$
0.04	0.04

Tabla 1. Coeficientes de fricción.

### 3.4. Segunda Ley de Newton

La segunda ley de Newton establece qué sucede con un cuerpo sobre el cual se están aplicando una o más fuerzas; produciendo el movimiento del mismo. Textualmente, esta ley establece que “La aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él e inversamente proporcional a su masa.” [23], de lo que se obtiene la expresión consignada en la ecuación 3.

$$\vec{a} \propto \frac{\sum \vec{\mathbf{F}}}{m} \quad (3)$$

Si se asume una constante proporcional de 1, se obtiene la ecuación 4

$$\sum \vec{\mathbf{F}} = m\vec{a} \quad (4)$$

Donde,

- $\vec{a}$  es la aceleración del cuerpo.
- $\sum \vec{\mathbf{F}}$  es la suma total de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo.
- $m$  es la masa del cuerpo.

### 3.5. Pseudo Inversa de Moore-Penrose

En álgebra lineal, se define como la inversa de una matriz  $\mathbf{A}_{n \times n}$ , a una matriz  $\mathbf{A}_{n \times n}^{-1}$  si y solo si cumple la siguiente condición [25],

$$\mathbf{A}_{n \times n} \mathbf{A}_{n \times n}^{-1} = \mathbf{I}_{n \times n} \quad (5)$$

La ecuación 5 aplica para sistemas que cuenten con una única solución, es decir, sistemas matriciales cuadrados.

Para sistemas cuya matriz no cuenta con inversa, se propone un método de ajuste por mínimos cuadrados, con lo cual se introduce el concepto de pseudo inversa. La pseudo inversa, es el equivalente a la inversa de sistemas matriciales de la forma mostrada en la ecuación 6 que cuentan con múltiples soluciones (ecuación 7).

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

La ecuación 8 muestra la forma de hallar la pseudo inversa  $A^+$ ; el resultado de la multiplicación de dicha matriz por la matriz de soluciones  $b$ , dará como resultado  $x$ , que para este documento, llamaremos Factor de Ajuste Proporcional (ecuación 9).

$$\mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \quad (8)$$

$$x = \mathbf{b}_{1 \times n} \mathbf{A}_{n \times 1}^+ : \text{Factor de Ajuste Proporcional} \quad (9)$$

### 3.6. Error Cuadrático Medio (RMS)

En estadística, se define error RMS a la raíz cuadrada de la suma del cuadrado de los errores dividida por el número total de los mismos [26].

Teniendo un vector de medidas teóricas  $m_t = [m_{t1}, m_{t2}, \dots, m_{tn}]$  y un vector de medidas prácticas  $m_m = [m_{m1}, m_{m2}, \dots, m_{mn}]$ , es posible hallar la diferencia (error) para cada medida de la forma mostrada en la ecuación 10.

$$E = m_t - m_m \quad (10)$$

Por lo tanto, su error cuadrático medio, estaría definido por la ecuación 11.

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |E_i|} \quad (11)$$

Donde  $N$  es el número de elementos del vector  $E$ .



## 4. MARCO TEÓRICO

En esta sección se expone el funcionamiento de dos modelos teóricos, los cuales comparten su principio de funcionamiento con los módulos a desarrollar. Estos modelos teóricos, no necesariamente describen en detalle el comportamiento de los movimientos analizados, pero su comportamiento debe ser semejante.

### 4.1. Experimento Plano Inclinado

El experimento que se plantea en esta sección consiste en analizar el movimiento de un cuerpo de masa  $m$  que se desplaza a través de un carril o plano inclinado de longitud  $D$  a un ángulo  $\theta$ , como se muestra en la figura 1.

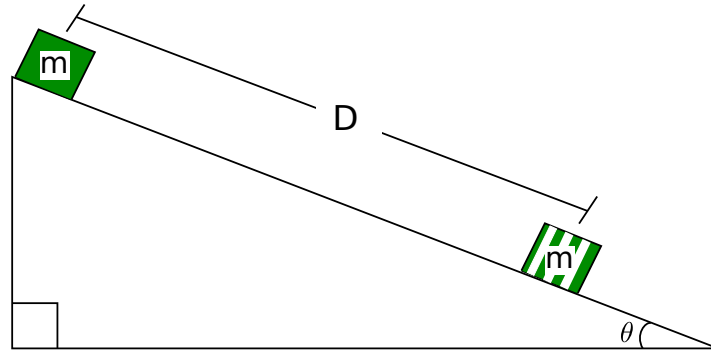


Figura 1. Esquema movimiento de cuerpo en plano inclinado.

A partir del diagrama de cuerpo libre expuesto en la figura 2 y de la segunda ley de Newton (sección 3.4) es posible hallar la aceleración del cuerpo en un instante de tiempo determinado.

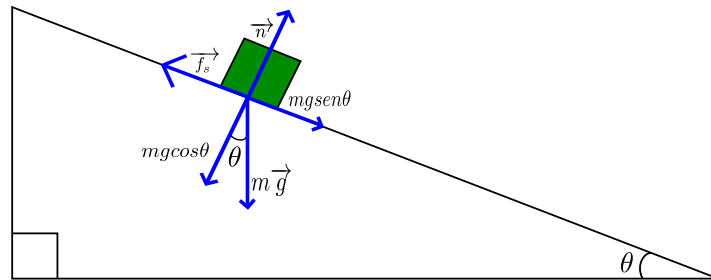


Figura 2. Diagrama de cuerpo libre.

Como se puede observar en la figura 2, las fuerzas que actúan sobre la masa son la normal  $(\vec{n})$ , el peso  $m\vec{g}$  y la fuerza de fricción  $\vec{f}_s$ ; estas son explicadas en la sección 3.3 . Dado que el coeficiente de fricción para esta aplicación es despreciable dado el movimiento de la masa (véase tabla 1), se considerará nulo[23].

Aplicando la ecuación 4 a la masa  $m$  y realizando una sumatoria de fuerzas en cada eje, se obtiene que la aceleración en el eje  $x$  es  $a_x$ , es,

$$a_x = g * \sin\theta \quad (12)$$

Dado que la aceleración es constante, es posible emplear las expresiones usadas en Movimiento Uniformemente Acelerado (M.A.S), como la mostrada en la ecuación 13.

$$v_{fx}^2 - v_{ox}^2 = 2 * a_x * (x - x_o) \quad (13)$$

Donde,

- $v_{fx}$  es la velocidad de la masa  $m$  después de desplazarse por el plano inclinado una distancia determinada  $D$ .
- $v_{ox}$  es la velocidad inicial de la masa  $m$ .
- $x$  es la posición final de la partícula cuando se termina su desplazamiento.
- $x_o$  es la posición inicial de la partícula.

Por tanto, la velocidad final de una partícula en un intervalo de distancia dado es:

$$v_{fx} = \sqrt{2 * a_x * (x - x_o) + v_{ox}^2} \quad (14)$$

Otra forma de obtener la velocidad es mediante la ecuación,

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x - x_0}{t - t_0} \quad (15)$$

Donde,

- $t_0$  es el tiempo donde inicia el movimiento.
- $t$  es el tiempo en el que finaliza el movimiento.

Haciendo  $mg = F_g$  en la ecuación 12, se obtiene,

$$F_g = \frac{a_x}{\text{sen}\theta} * m \quad (16)$$

Donde,

- $F_g$  es la fuerza gravitacional total.

Lo que supone un método efectivo de medición de la gravedad mediante el uso de un carril en cuyos elementos los coeficientes de fricción y, por tanto, la fuerza de fricción, tiende a ser cero; dado que se conocen datos como la distancia recorrida por la masa  $m$ , su velocidad inicial y su velocidad final.

## 4.2. Experimento Péndulo Simple

Se define como péndulo a una masa suspendida de una cuerda (de longitud  $L$ ) de masa despreciable con respecto a la suya. El movimiento de esta masa es periódico, y es posible demostrar que si el ángulo de inclinación  $\theta$  es pequeño ( $\theta \lesssim 10^\circ$ ), este puede ser catalogado como un oscilador armónico simple [23].

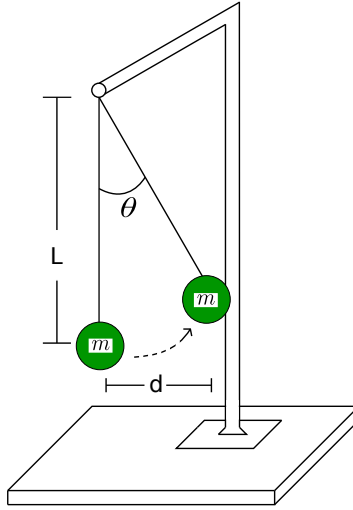


Figura 3. El péndulo.

Del análisis de fuerzas del péndulo mostrado en la figura 3, es posible obtener el gráfico de la figura 4.

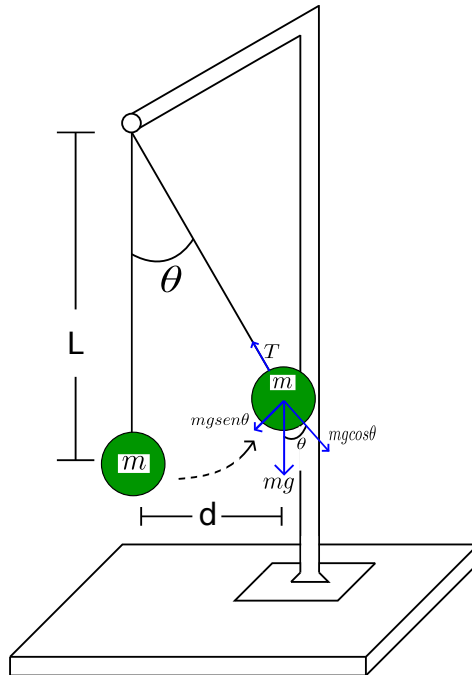


Figura 4. Diagrama cuerpo libre péndulo simple.

Donde, aplicando la segunda ley de Newton, se obtiene,



$$F_t = -mg \operatorname{sen} \theta = m \frac{d^2 d}{dt^2} \quad (17)$$

Donde  $d$  es la distancia desde el punto de reposo del péndulo hasta la posición donde se inicia el movimiento. Dado que  $d = L\theta$  y  $L$  es constante, se tiene,

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = -\frac{g}{L} \operatorname{sen} \theta \quad (18)$$

Si,

$$\theta < 10^\circ$$

Entonces,

$$\operatorname{sen} \theta \approx \theta$$

Por lo tanto,

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = -\frac{g}{L} \theta \quad (19)$$

Dado que,

$$T = 2\pi f = \frac{2\pi}{\omega} \quad (20)$$

Para este caso,  $\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$ .

Reemplazando  $\omega$  (frecuencia angular) en 20,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (21)$$

Por lo tanto, es posible concluir que el período ( $T$ ) de un péndulo solo depende de la longitud ( $L$ ) del mismo y de la gravedad local ( $g$ ).

## 5. DISEÑO METODOLÓGICO

El diseño metodológico de un proyecto es de fundamental importancia, pues es en este donde se lleva a cabo la planeación de cómo se realizará el mismo. Para este caso, esta sección está dividida en dos partes que a su vez, constan de varias subsecciones, donde se plantean cómo se desarrollará cada uno de los módulos, desde su diagrama de flujo, hasta el producto final.

### 5.1. Diseño Módulo Plano Inclinado

La metodología de este proyecto está constituida por el diseño de cada una de las etapas del sistema. El sistema propuesto se muestra en la Figura 5, donde se pueden observar 6 grandes etapas, que a su vez están compuestas por diversas subetapas.

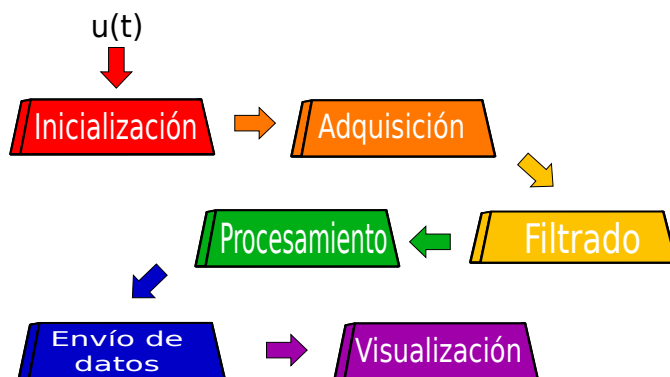


Figura 5. Modelo de bloques.

El diagrama de bloques mostrado en la figura tienen el fin de llevar a cabo el planteamiento de la figura 6.

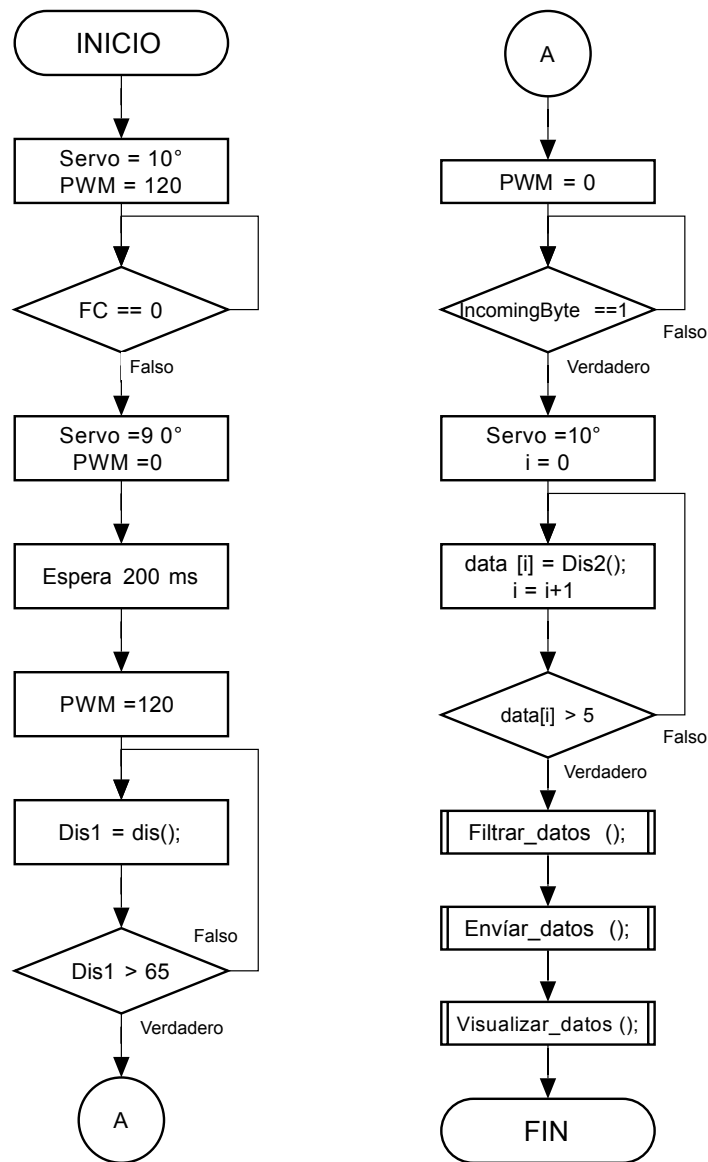


Figura 6. Diagrama de flujo.

Donde,

- FC: es el sensor de contacto o final de carrera (véase sección 5.1.2).
- dis(): es una función que permite calcular la distancia haciendo uso del sensor ultrasonido HC-SR04 (véase sección 5.1.2).
- PWM: es la función de pulso de amplitud modulada, que es utilizado para el control del

motor DC.

- IncomingByte: dato proporcionado por el usuario a través de la página web.
- Servo: ángulo indicado al servomotor para asegurar o liberar la masa.
- Enviar\_datos();
- Visualización();

A continuación se expone el diseño de cada una de las etapas del sistema de la figura 5. Iniciando, se cuenta con la etapa de inicialización y la etapa de adquisición, donde se explican el punto de partida del sistema y también cada uno de los sensores y actuadores utilizados; luego, se procede a la etapa de filtrado de datos; y de esta manera se va avanzando entre etapas hasta finalizar en la etapa de visualización.

#### 5.1.1. Etapa de inicialización

Al momento de realizar cualquier experimento, es necesario llevar el sistema a un punto inicial donde sus condiciones sean conocidas. Para este caso, el punto partida se establece cuando la distancia  $d1$  es máxima ( $0,65m$ ); esto es ilustrado en la figura 7. Con este objetivo, el sistema debe ejecutar correctamente la sección del diagrama de flujo ubicada entre los puntos “INICIO” y “A”, de la figura 6.

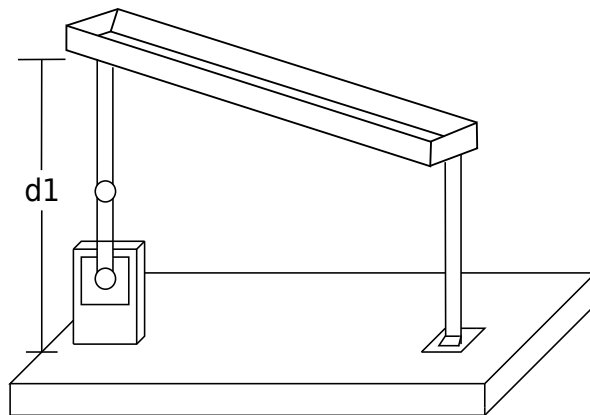


Figura 7. Punto de partida.

Figura 8. Servomotor.

### 5.1.2. Etapa de adquisición y control

Los equipos automatizados generalmente cuentan con diversos sensores y actuadores que les permiten prescindir, parcial o permanente, de la presencia de un humano que los esté controlando.

Un servomotor, como su nombre lo indica, es un motor de seguimiento, que permite el ajuste de la posición de su eje según un número de grados  $[\circ]$  requerido. Esta clase de motores es ampliamente usado en aplicaciones como funcionamiento de elevadores, timones, entre otros. Un ejemplo de servomotor es mostrado en la figura 8.

Un motor DC es un dispositivo cuyo principio de funcionamiento se basa en la conversión de la energía eléctrica en energía mecánica. Esta clase de motores, cuenta con un torque igual a cero entre sus características, por tanto, para esta aplicación, es necesario el acople de de una caja reductora con el fin de disminuir lsu velocidad de giro y aumentar el torque. Este dispositivo, ilustrado en la figura 9, es de amplio uso cormercial y entre sus aplicaciones más comunes se encuentran el funcionamiento de las plumillas limpia parabrisas de los automóviles y el control de los vidrios eléctricos. Dado el gran torque proporcionado por esta clase de motores al tener acoplada una caja reductora, su fácil adquisición y su bajo costo; estos se constituyen como un instrumento con las características idóneas para el desarrollo de este módulo.



Figura 9. Motor DC con caja reductora.

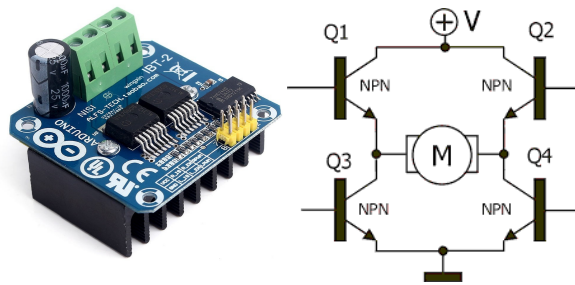


Figura 10. Puente H BTS7960.

Dado que el movimiento de un motor DC necesita una cantidad de corriente muy grande, comparada con la que puede proporcionar un pin de salida de un sistema embebido, se hace necesario el uso de un puente H. Dicho elemento permite la ganancia de corriente requerida por el motor para su desplazamiento a partir de una tensión proporcionada. Este elemento puede ser observado en la figura 10.

Un final de carrera o sensor de contacto es un dispositivo de tipo eléctrico, mecánico o neumático; que para este sistema, está ubicado en un extremo del carril por el que viaja la masa sobre la cual se están realizando diferentes medidas; y es accionado cuando esta ha terminado su recorrido. En este punto, entra en funcionamiento el servomotor, encargado de asegurar la masa en el momento exacto en que esta entra en contacto con el final de carrera. En la figura 11 se muestra un ejemplo de lo que es un final de carrera.

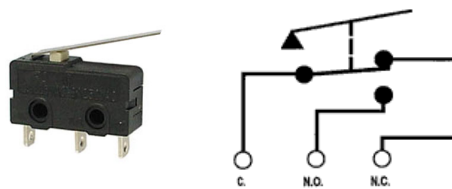


Figura 11. Final de carrera o sensor de contacto.

En la figura 12 se exponen los elementos anteriormente mencionados. Por convención propia, los elementos de color azul y los elementos de color rojo, serán considerados como las entradas (sensores) y las salidas (actuadores) del sistema, respectivamente. El esquema de la ubicación de los sensores y actuadores

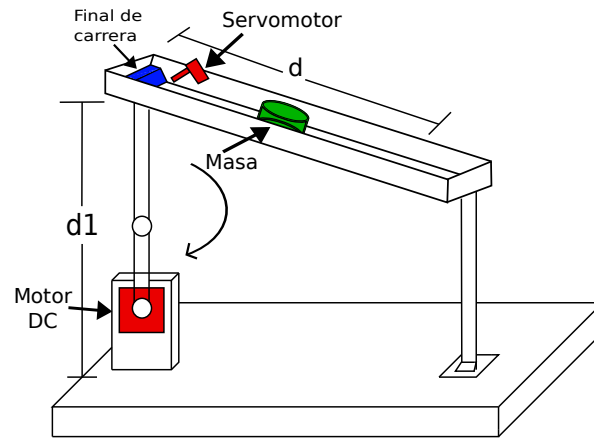


Figura 12. Ubicación parcial de sensores y actuadores.

En el otro extremo del carril, se encuentra ubicado un sensor ultrasonido HC-SR04, al que se llamara HC-SR04(1). Este está encargado de tomar una muestra cada determinado tiempo para saber la distancia a la que se encuentra la masa, del final del carril. Este sensor es mostrado en la figura 13.

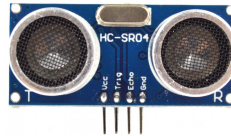


Figura 13. Sensor ultrasonido HC-SR04.

Dicho sensor cuenta con las siguientes características:

- Rango de operación entre 2cm - 450cm.
- Tensión de alimentación 5V.

Por lo que se ajusta a las aplicaciones requeridas para este sistema, dado que el rango máximo de medida requerido es de 60cm y el mínimo 5cm.

Con el objetivo de desplazar el carril hasta su posición de inicio, se ubica otro sensor HC-SR04 (HC-SR04 (2)) en la base del sistema. La señal proporcionada por este, detiene el motor una



vez se haya alcanzado la altura requerida para el inicio del experimento.

Finalizado esta etapa, se cuenta con el esquema final del sistema con todos sus sensores y actuadores, este es presentado en la figura 14.

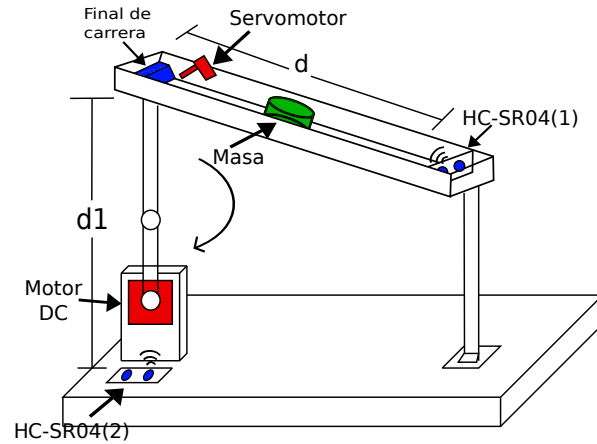


Figura 14. Esquema final del sistema con sensores y actuadores.

### 5.1.3. Etapa de procesamiento de señales

La etapa de procesamiento de señales está descrita por el diagrama de bloques mostrado en la figura 15, donde se puede observar cómo los sensores descritos en la sección 5.1.2 (bloques azules) van hacia un Arduino Mega 2560, constituyendo las entradas del sistema; además, se pueden observar también, el motor DC, el servomotor y la comunicación Ethernet (bloques rojos) saliendo del dispositivo, por lo que se constituirían como las salidas del sistema establecido.

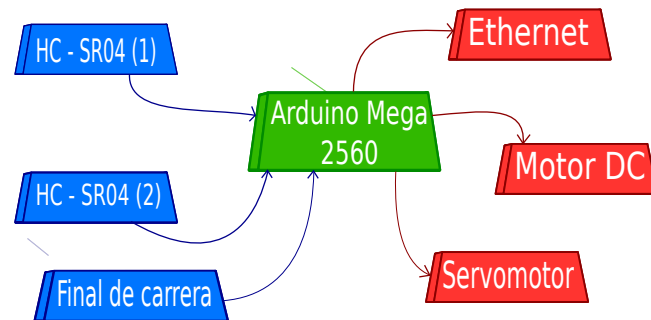


Figura 15. Diagrama de bloques de Etapa de Procesamiento de Señales.

El Arduino Mega 2560 (Figura 16) es utilizado para hacer las veces de un sistema control y un sistema de adquisición y transmisión de datos, por lo tanto, es el encargado de recabar la información de los sensores y conforme a esta, iniciar la marcha del experimento. Este cuenta con:

- 54 pines de entrada/salida digital (15 salidas de PWM).
- 16 pines de entrada análoga.
- Conversor analógico digital de 10 bits.

Asimismo, es de fácil acceso comercial, hace uso de un lenguaje de programación libre (lenguaje C) [27], y además cuenta con diversas librerías que lo hacen compatibles con múltiples sensores; y con un sin número de shells o placas modulares que permiten la adaptación del mismo a distintas aplicaciones. Teniendo en cuenta las características anteriormente mencionadas y el hecho de que se requiere controlar un motor DC, las salidas de PWM de este dispositivo constituyen una herramienta fundamental para el sistema de control.

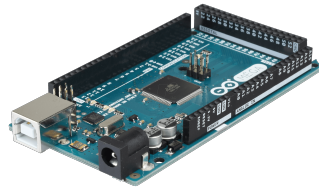


Figura 16. Arduino Mega 2560.

Con el fin de establecer una comunicación entre el Arduino Mega 2560 y el usuario, es necesario contar con el software Processing. Este software es una herramienta programable en lenguaje Java y facilita la transmisión de datos entre el PC o servidor y el Arduino. Debido a que es un IDE de código libre y a que su lenguaje de programación es ampliamente conocido, este software reúne las especificaciones básicas necesarias para la ejecución de este proyecto.

Una vez finalizado el experimento, el Arduino Mega 2560 envía los datos obtenidos a una base de datos SQL a través de comunicación Ethernet. Con el objetivo de establecer dicha

comunicación, se hace uso de un Shell Ethernet para Arduino, este es mostrado en la figura 17.

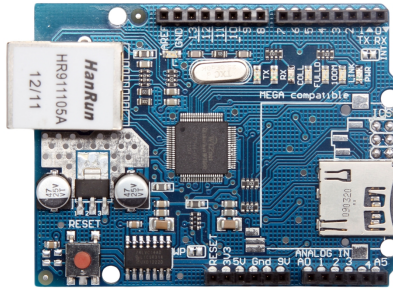


Figura 17. Shell Ethernet Arduino.

Finalmente, el esquema total del experimento puede ser observado en la figura 18.

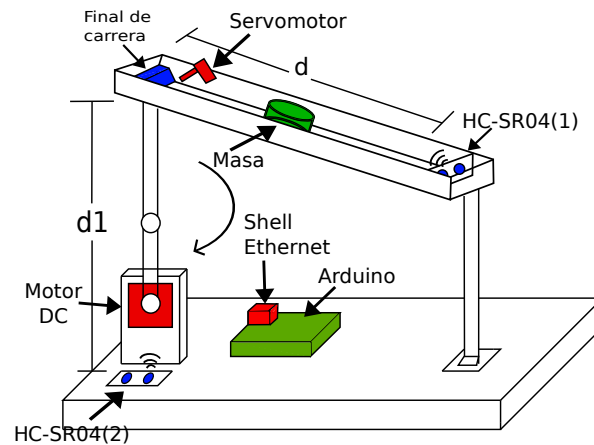


Figura 18. Esquema completo del sistema.

#### 5.1.4. Etapa de filtrado de datos

El filtrado de datos es de suma importancia en los experimentos prácticos, pues al momento de realizar medidas, estas se pueden ver afectadas por ruido electromagnético, acústico, entre otros. También, pueden interferir factores como errores humanos debidos a la mala calibración del sensor utilizado, o bien fallos propios del mismo.

Para este experimento, se hace uso de un filtro de mediana, donde se organizan los datos de forma descendente y se toman las muestras 4, 5 y 6 (según su orden de izquierda a derecha); como se muestra en la figura 19.

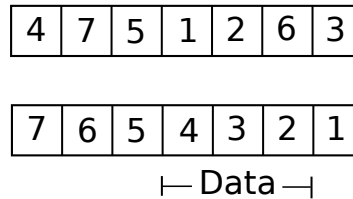


Figura 19. Filtro de mediana.

Posteriormente, se halla la media de estas tres muestras y ese resultado sería la muestra a utilizar para realizar los debidos cálculos.

#### 5.1.5. Etapa de envío de datos

Como se menciona en la la sección 5.1.3, el envío de datos se hace mediante comunicación Ethernet y estos son almacenados en una base de datos SQL; esto es posible debido a la ejecución de un código escrito el lenguaje PHP por parte del Arduino Mega 2560. Este procedimiento se realiza con el fin de procesar la información obtenida y filtrar posibles datos erróneos para, posteriormente, mostrar los resultados en una página web.

La ejecución del código de envío de datos es realizada a través de la comunicación serial del Arduino, mediante el requerimiento de una página web que acciona un método GET, en lenguaje PHP, almacenado en un servidor cuya dirección IP es establecida previamente en la configuración del sistema microcontrolado.

	Id_muestra	Muestra
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	1	60
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	2	60
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	3	60
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	4	60
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	5	60
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	6	60
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	7	59
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	8	59
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	9	59
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	10	59
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	11	59
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	12	59
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	13	59
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	14	58
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	15	58
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	16	58
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	17	58

Figura 20. Base de datos MySQL.

En la figura 20 es posible observar como cada muestra está compuesta por un par de datos, los cuáles son una identificación de muestra, que permite que se mantenga un orden entre las muestras y por la muestra obtenida por el sensor HC-SR04(1).

#### 5.1.6. Etapa de visualización

La etapa de visualización cumple un rol fundamental en la comunicación acertiva de la transmisión del conocimiento, pues es en esta donde se presentan los resultados obtenidos durante el experimento al usuario final; por lo tanto, exhibir dicha información de forma estructurada es indispensable. En la figura 21 se muestra la página inicial del experimento, donde el usuario da inicio al mismo; una vez finalizado, el usuario es redirigido a una pagina web donde se

muestran los resultados obtenidos, esta consta de dos partes y es mostrada en las figuras 22 y 23.



Figura 21. Index Plano Inclinado.

En la figura 22 se expone una página web en la que se muestran los resultados obtenidos para determinadas distancias (en centímetros), para el experimento del plano inclinado.

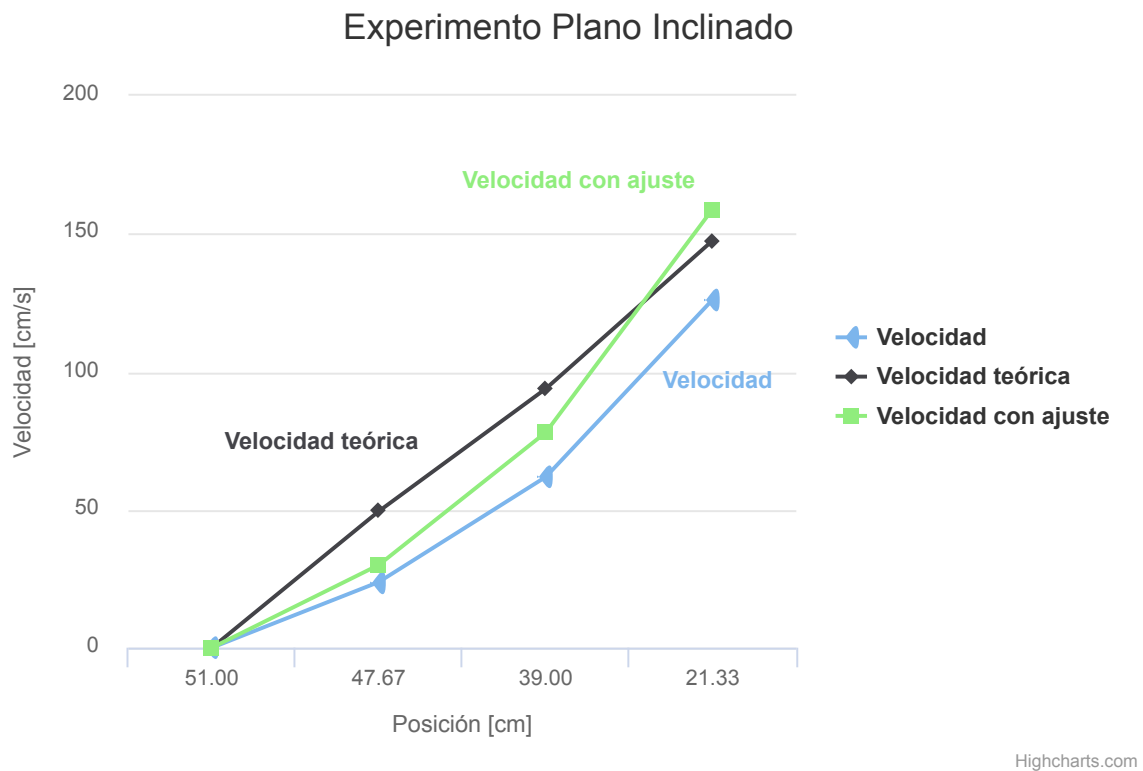


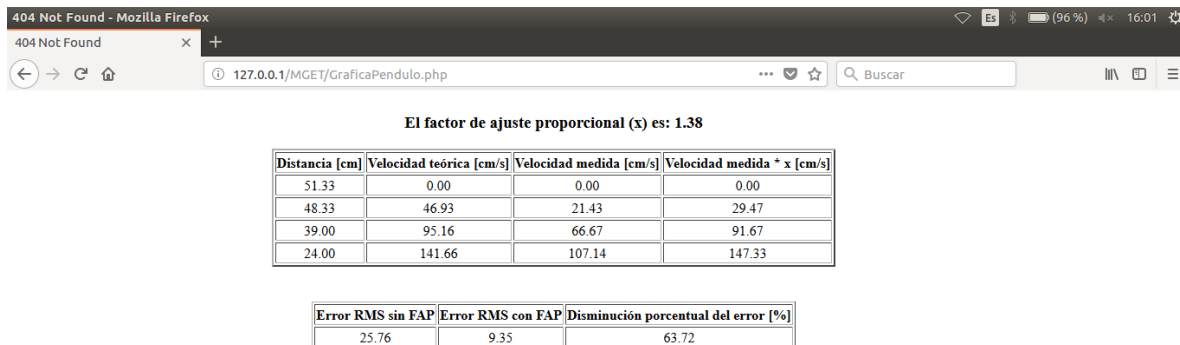
Figura 22. Página de visualización.

En la figura 22 se muestra,

- De color azul la velocidad práctica hallada según las muestras obtenidas por el sensor.

- De color negro la velocidad teórica hallada según el desplazamiento de la partícula a través del plano.
- De color verde la velocidad práctica hallada multiplicada por un factor de ajuste proporcional  $x$  (sección 3.5).

Dado que la mayoría de los experimentos poseen resultados diferentes, se hace necesario un Factor de Ajuste Proporcional que se adapte a cada uno de ellos y este debe ser mostrado una vez finalizado el experimento. En la figura 23 se muestran los resultados del experimento, dos tablas de error (con y sin FAP), el porcentaje de disminución de error y finalmente el Factor de Ajuste Proporcional ( $x$ ).



The screenshot shows a Mozilla Firefox browser window with a 404 Not Found error. The address bar displays the URL 127.0.0.1/MGET/GraficaPendulo.php. Below the error message, the text 'El factor de ajuste proporcional (x) es: 1.38' is displayed. Two tables are shown: the first table lists distance, theoretical velocity, measured velocity, and adjusted velocity for four different distances; the second table shows the RMS error and percentage error reduction for the same four distances.

El factor de ajuste proporcional (x) es: 1.38			
Distancia [cm]	Velocidad teórica [cm/s]	Velocidad medida [cm/s]	Velocidad medida * x [cm/s]
51.33	0.00	0.00	0.00
48.33	46.93	21.43	29.47
39.00	95.16	66.67	91.67
24.00	141.66	107.14	147.33

Error RMS sin FAP	Error RMS con FAP	Disminución porcentual del error [%]
25.76	9.35	63.72

Figura 23. Tablas de resultados.

## 5.2. Diseño Módulo Péndulo Simple

Para el desarrollo de este módulo, se plantean las mismas etapas que las del módulo Plano Inclinado (véase figura 5). Con etapas, se busca la ejecución completa del planteamiento de la figura 24.

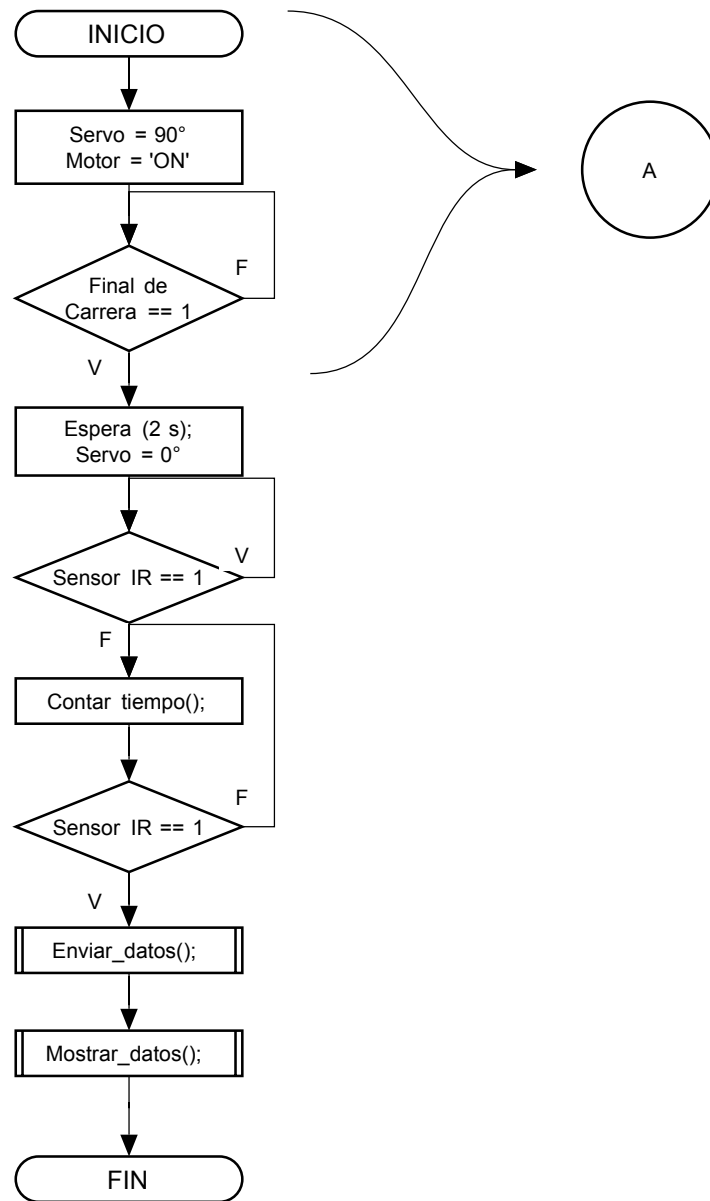


Figura 24. Diagrama de flujo.

### 5.2.1. Etapa de inicialización

Como en el módulo anterior, al momento de realizar cualquier experimento, es necesario llevar el sistema a un punto inicial donde sus condiciones sean conocidas. Para este caso, el punto partida se establece cuando el ángulo de inclinación es máximo ( $\theta \approx 10^\circ$ ); esto es ilustrado en la figura 25. Con este objetivo, el sistema debe ejecutar correctamente la sección del diagrama



de flujo ubicada entre los puntos INICIO y A, de la figura 24.

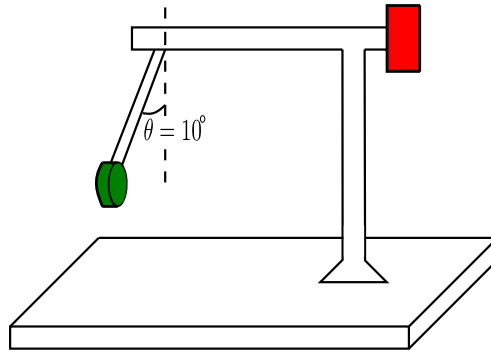


Figura 25. Punto de partida.

Una vez alcanzado este punto, la cuerda de la cual se encuentra suspendida la masa, será asegurada mediante un servomotor que mantendrá el sistema en este punto.

### 5.2.2. Etapa de adquisición y control

Un sensor infrarrojo (IR) es aquel que mide la radiación electromagnética dentro de un rango de operación dado. Dado que todos los cuerpos emiten un nivel de radiación, este permite conocer en qué momento se encuentra un objeto justo en frente de él. En estos sensores, el nivel de radiación necesaria para la activación de los mismos, generalmente es graduable, por lo que su calibración dependerá del lugar donde se encuentre ubicado y del objeto que se desee detectar. Un ejemplo de esta clase de sensores es mostrado en la figura 26. Por lo tanto, debido a sus características anteriormente mencionadas y a su bajo costo, este sensor se asenta como pieza clave de este módulo.



Figura 26. Sensor infrarrojo.

De igual forma que en el módulo anterior, este sistema automatizado hace uso de elementos sensores y actuadores, estos son,

- Un final de carrera.
- Un motor DC.
- Un sensor infrarrojo.

Con el objetivo de llevar a cabo la correcta inicialización del sistema, se emplea un final de carrera (figura 11), de modo que mientras este no se encuentre activado, el motor DC ubicado en la parte superior del módulo desplace la masa hasta el punto de partida anteriormente mencionado. Una vez alcanzado este punto, el final de carrera será accionado y la masa será liberada por el servomotor. El sensor infrarrojo empezará a contar el tiempo una vez la masa halla pasado en frente suyo por primera vez, y se detendra inmediatamente después de que la masa halla vuelto a pasar; el tiempo capturado por este sensor, será posteriormente procesado y enviado vía ethernet a una base de datos para su análisis.

Dado que los elementos mencionados han sido descritos en detalle en la sección 5.1.2, no se hará énfasis esta vez en ellos.

El diagrama completo del módulo es presentado en la figura 27.

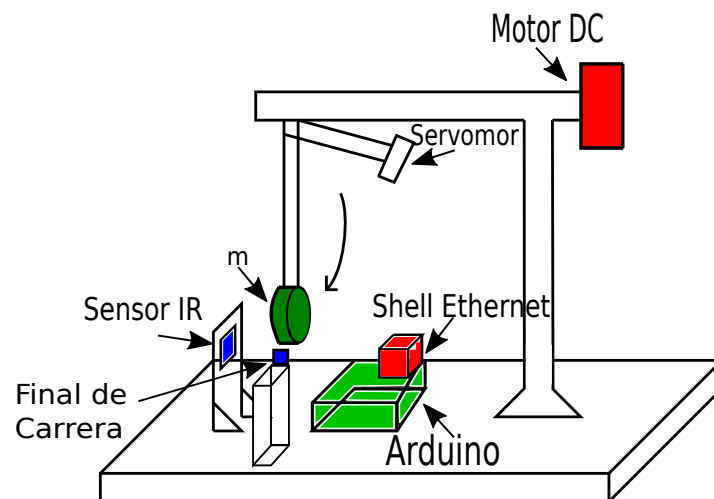


Figura 27. Esquema final del sistema con sensores y actuadores.

### 5.2.3. Etapa de procesamiento de señales

Esta etapa se encuentra descrita por el diagrama mostrado en la figura 28. Anteriormente se había adoptado la convención de,

- Elementos azules: sensores.
- Elementos rojos: actuadores.

Para este caso, dicha convención sigue en uso.

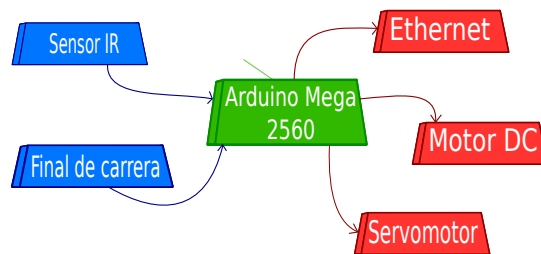


Figura 28. Diagrama de bloques etapa de procesamiento de señales.

El diagrama enseña los elementos conectados de modo que los sensores van hacia el Arduino Mega 2560 y los actuadores salen de él; de esta forma, los sensores se constituyen como las entradas del sistema y los actuadores como las salidas del mismo.

Una vez el sistema entra en funcionamiento, el Arduino Mega 2560 es el encargado de recolectar los datos provenientes del sensor infrarrojo para su posterior filtrado y envío a la base de datos mediante el uso de un shell ethernet (véase sección 5.1.3) .

### 5.2.4. Etapa de envío de datos

Como se menciona en la la sección 5.1.3, el envío de datos se hace mediante comunicación Ethernet y estos son almacenados en una base de datos SQL; esto es posible debido a la ejecución de un código escrito el lenguaje PHP por parte del Arduino Mega 2560. Este procedimiento se realiza con el n de procesar la información obtenida y filtrar posibles datos erróneos para, posteriormente, mostrar los resultados en una página web.

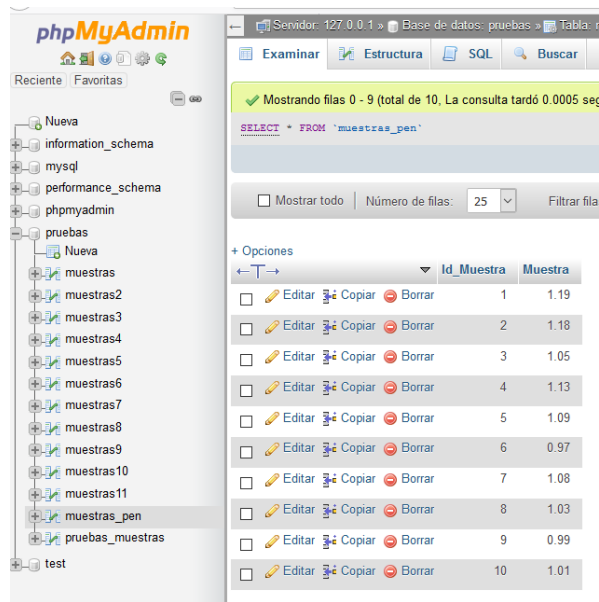
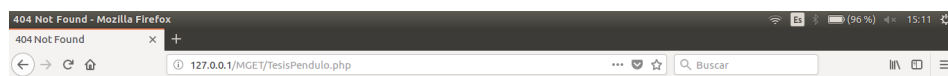


Figura 29. Base de datos MySQL.

En la figura 29 es posible observar como cada muestra está compuesta por un par de datos, los cuáles son una identificación de muestra, que permite que se mantenga un orden entre las muestras y por la muestra obtenida por el sensor IR.

### 5.2.5. Etapa de visualización

La página de visualización se encuentra compuesta por las figuras 30, 31 y 32; en estas es posible observar la página principal que da inicio al experimento, las gráficas resultantes del experimento y las tablas con los resultados del experimento, respectivamente.



## Tesis: Experimento Péndulo Simple

Inicializar experimento Soltar masa

Figura 30. Index Péndulo Simple.

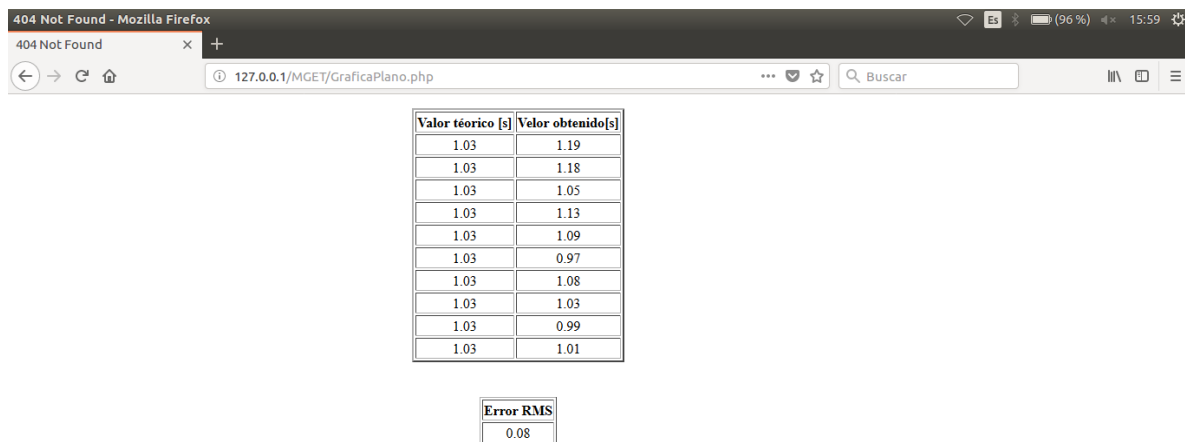


Figura 32. Tablas de resultados.

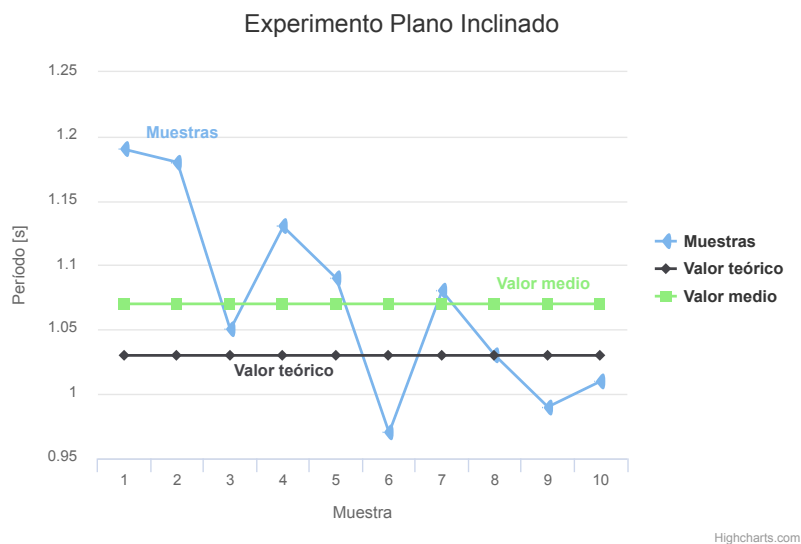


Figura 31. Página de visualización.

En la figura 31 es posible observar dos líneas,

- La línea de color azul muestra los datos obtenidos por el sensor IR.
- La línea de color negro es el dato calculado de forma teórica.
- La línea de color verde es la media de las muestras obtenidas.

A priori, es posible decir que el comportamiento mostrado por estos resultados es de tipo

gaussiano, pues algunos datos se encuentran por encima y otros por debajo del valor de teórico; por lo tanto, al calcular la media de estas muestras, se estaría calculando su valor esperado.

## 6. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

En esta etapa, se presentan los resultados obtenidos al validar el desempeño ambos experimentos, aplicando error cuadrático medio (sección 3.6) para la estimación del error.

### 6.1. Experimentos y Resultados del Módulo Plano Inclinado

Para entender las tablas 2, 3 y 4, es necesario tener en cuenta que,

- $V_t$  es el valor teórico calculado a partir de la ecuación 14.
- $V_m$  es la velocidad obtenida a partir del sensor, mediante la ecuación 15.
- $x$  es el Factor de Ajuste Proporcional (véase sección 3.5).

En la tabla 2 es posible observar los resultados obtenidos para 3 pruebas realizadas al experimento Plano Inclinado. Si bien los datos obtenidos para las primeras 3 muestras no presentan cercanía considerable con los valores esperados, es factible contemplar que tanto el comportamiento de  $V_t$  y  $V_m$  son el mismo, ambos van en ascenso; y la muestra 4 presenta una menor distancia con respecto al valor teórico de la misma, por tanto, a priori se podría concluir que un instante de tiempo determinado  $t$ , la diferencia entre  $V_t$  y  $V_m$  sería tendiente a 0.

Prueba No. 1			Prueba No. 2			Prueba No. 3		
Distancia [cm]	$V_t[\frac{cm}{s}]$	$V_m[\frac{cm}{s}]$	Distancia [cm]	$V_t[\frac{cm}{s}]$	$V_m[\frac{cm}{s}]$	Distancia [cm]	$V_t[\frac{cm}{s}]$	$V_m[\frac{cm}{s}]$
51.00	0.00	0.00	51.00	0.00	0.00	50.33	0.00	0.00
47.66	49.47	23.80	48.33	44.25	19.05	47.66	44.25	25.66
39.00	93.86	61.90	39.00	93.86	66.66	38.66	92.55	86.59
21.33	147.58	126.19	23.66	141.66	109.52	23.33	140.79	147.53

Tabla 2. Resultados obtenidos.

No obstante, con el fin de mejorar los resultados obtenidos, se hace uso del Factor de Ajuste Proporcional (FAP)  $x$ , tal que, según el método Mínimos Cuadrados, sea posible reducir el error entre las muestras obtenidas  $V_m$  y los datos calculados de forma teórica  $V_t$ . Los resultados de la

aplicación de este método son mostrados en la tabla 3. Como se observa, las diferencias entre las muestras esperadas y las obtenidas, multiplicadas por un factor  $x$ , disminuyen notoriamente, por lo que el FAP se constituye como una herramienta fundamental para la eliminación parcial de la disparidad presetanda entre un modelo teórico y un modelo real.

Prueba No. 1			Prueba No. 2			Prueba No. 3		
Distancia [cm]	$V_t[\frac{cm}{s}]$	$V_m * x[\frac{cm}{s}]$	Distancia [cm]	$V_t[\frac{cm}{s}]$	$V_m * x[\frac{cm}{s}]$	Distancia [cm]	$V_t[\frac{cm}{s}]$	$V_m * x[\frac{cm}{s}]$
51.00	0.00	0.00	51.00	0.00	0.00	50.33	0.00	0.00
47.66	49.47	30.00	48.33	44.25	25.04	47.66	44.25	25.66
39.00	93.86	70.02	39.00	93.86	89.73	38.66	92.55	86.59
21.33	147.58	159.03	23.66	141.66	147.42	23.33	140.79	147.53
$x = 1,26$			$x = 1,35$			$x = 1,35$		

Tabla 3. Resultados obtenidos con Factor de Ajuste Proporcional.

En la tabla 4 se presentan los errores RMS para las 3 pruebas realizadas, tanto con como sin la aplicación del FAP y queda ratificado que este factor disminuye considerablemente le error, pues en el peor de los casos, este disminuye en 40 %; un resultado satisfactorio para esta aplicación.

	Prueba No. 1	Prueba No. 2	Prueba No. 3
Error RMS sin FAP ( $x$ )	23.12	24.53	24.55
Error RMS con FAP ( $x$ )	13.79	9.95	10.32
% de disminución de error [%]	40.35	59.44	57.96

Tabla 4. Error RMS.

## 6.2. Experimentos y Resultados del Módulo Péndulo Físico

Los resultados obtenidos para este experimento constituyen un espaldarazo a la afirmación de que un péndulo simple se puede modelar mediante ecuaciones de movimientos oscilatorios uniformes.

En la tabla 5 se muestran los resultados de 10 pruebas hechas al módulo en cuestión. Como se puede observar, en algunas ocasiones se presentan diferencias respecto al valor esperado. A



pesar de dichas diferencias, los valores obtenidos son muy cercanos al valor esperado, calculado mediante la ecuación 21.

Dado que para este caso  $L = 26,5cm$  y  $g = 980 \frac{cm}{s^2}$ , se tiene que el valor teórico de  $T = 1,03s$ .

Resultados teóricos obtenidos			Promedio Resultados
Prueba	$\theta[^\circ]$	Período (T) [s]	1,07s
1	10	1.19	
2		1.18	
3		1.03	
4		1.13	
5		1.09	
6		0.97	
7		1.08	
8		1.03	
9		0.99	
10		1.01	

Tabla 5. Resultados teóricos obtenidos.

Error RMS total
0.08

Tabla 6. Error RMS.

La tabla 6 muestra el valor del error RMS para estas diez pruebas, el cual es bastante aceptable teniendo en cuenta que el módulo construido es un prototipo y un sistema real, con parámetros de error intrínsecos a los elementos.



## 7. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos y sus respectivos errores, se puede concluir que los módulos de bajo costo diseñados cumplen a cabalidad con sus objetivos principales; si bien ambos cuentan con errores entre la medida obtenida y el valor teórico de la variable, estos son atribuibles a factores como a) la idealización de los sistemas planteados al momento de realizar los cálculos teóricos, b) defectos en los materiales utilizados para su construcción y c) resolución de los equipos utilizados. Defectos mecánicos que en un inicio se consideraron despreciables, al momento de tomar las muestras fueron fuente de grandes problemas para el ajuste entre los modelos, algunos de estos defectos fueron un pequeño desnivel y la falta de uniformidad de la superficie del carril del módulo plano inclinado, un pequeño imperfecto en la cuerda de la cual se encuentra suspendida el péndulo, entre otros. Dichos defectos debieron ser reparados para alcanzar el funcionamiento esperado de los módulos.

Durante la praxis, fue posible concluir que, en gran medida, los errores en las mediciones del módulo plano inclinado se dan en las primeras muestras, pues es allí donde el modelo teórico y el modelo real discrepan en la tenencia en cuenta de la fuerza necesaria por parte de la partícula para romper la inercia; pues el primero considera despreciable la masa de la misma. A medida que la partícula gana velocidad, es irrefutable que el modelo teórico coincide con el real, puesto que los valores de los mismos se van acercando cada vez más.

Los resultados obtenidos en la sección 6 muestran un error en disminución para las pruebas realizadas en la tabla 2, el cual inicia en 40 % y finaliza en 14 % en promedio para las 3 pruebas; resultados bastante aceptables teniendo en consideración los errores mencionados anteriormente. Cabe mencionar que este es el porcentaje de resultados exitosos máximo alcanzable por estos módulos tal cual están diseñados, pues al ser de bajo costo, están sujetos a imperfecciones en sus materiales de construcción.

## **7.1. TRABAJOS FUTUROS**

Un laboratorio remoto de física es aquel laboratorio en el que es posible realizar prácticas sin entrar en contacto directo con los equipos, pero teniendo en cuenta todos los parámetros intrínsecos de los mismos. El objetivo principal de esta clase de laboratorios es crear en el estudiante una conciencia acerca del entrelazamiento de la física teórica y el mundo real, por tanto, es indispensable que el el sujeto mencionado se relacione de forma visual con el elemento del cual está haciendo uso; sin embargo, en los objetivos de este trabajo de grado, no está contemplado el factor visión; lo cual deja la puerta abierta para que un invesitgador futuro adhiera esta variante y el estudiante sea testigo de que el experimento está siendo llevado a cabo.

## 8. ANEXOS

En esta sección se realiza una comparativa entre las alternativas para realizar este tipo de módulos, además, se presentan los prototipos finalizados.

### 8.1. Anexo A. Arduino Vs. BeagleBone Black: Una Comparativa

Una pregunta válida puede ser “¿Por qué usar Arduino cuando se puede usar una BeagleBone Black, que tiene mayor capacidad de procesamiento?”, pues a continuación se tiene la respuesta.

Según el portal digikey.com, a la fecha (1 de abril de 2018) una Beaglebone Black cuesta 56.25 USD, mientras que un Arduino Mega 2560 cuesta 38.50 USD. Realizando otra consulta en el sitio web didacticaselectronicas.com, una Beaglebone Black cuesta 263.000 COP, mientras que un Arduino Mega 2560 cuesta 138.000 COP; lo que hace posible concluir que una Beaglebone Black cuesta al menos 30 % más que el dispositivo propuesto por esta tesis.

Si bien las prestaciones de la Beaglebone Black son mayores en cuanto a procesamiento de datos y distribución de memoria, Arduino no se queda atrás; este cuenta con una velocidad de reloj de 16MHz, lo suficientemente rápida para ejecutar todas las instrucciones requeridas por la aplicación. También, cuenta con los pines necesarios para realizar de forma óptima la aplicación (54 pines I/O digitales, 14 de ellos salidas PWM y 16 entradas análogas) [27]. Finalmente, el consumo energético de un Arduino varía entre  $93mA$  y  $200mA$  según la aplicación, mientras que el de una Beaglebone Black oscila entre  $210mA$  y  $460mA$ .

Por lo mencionado anteriormente, y teniendo en cuenta que los experimentos elaborados en esta tesis son prototipos y están sujetos a cambios y mejoras, Arduino se constituye como la herramienta por defecto para el desarrollo de los mismos.

## 8.2. Anexo B: Prototipos finalizados

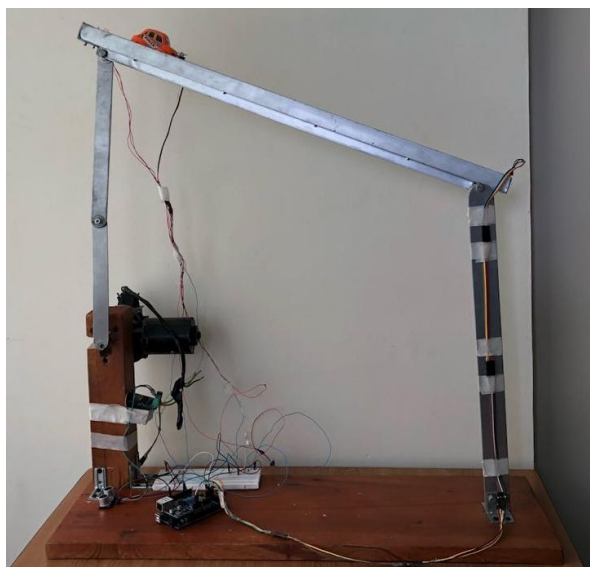


Figura 33. Prototipo finalizado del módulo plano inclinado.

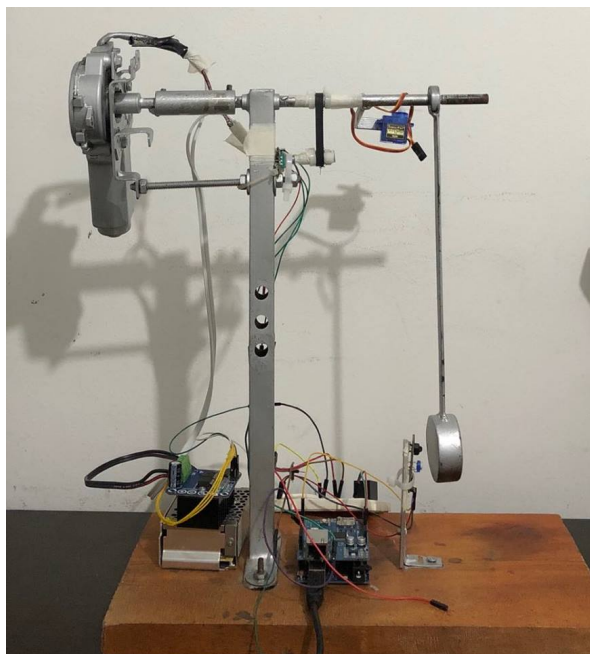


Figura 34. Prototipo finalizado del módulo plano inclinado.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] IMCYC. La importancia de los laboratorios. Revista Ingenieria Construccion y Tecnologia. IMCYC, 2006. 1.1, 1.2
- [2] LAS 2 ORILLAS. Como educamos en Colombia. Las 2 Orillas, 2014. 1.1
- [3] IMYMC. Infraestructura Escolar y Aprendizajes en la Educacion Basica Latinoamericana: Un analisis a partir del SERCE. IMYMC. 1.1
- [4] EL TIEMPO. Por que es tan mala la educacion en Colombia. El Tiempo, 2014. 1.1
- [5] MINISTERIO DE EDUCACION NACIONAL. Ministerio de Educacion Nacional. Ministerio de Educacion Nacional. URL <http://www.mineducacion.gov.co/1621/article-87818.html>. 1.1
- [6] EL TIEMPO. Los 14 articulos del sector TIC en el Plan Nacional de Desarrollo. El Tiempo., 2005. 1.1
- [7] AULA PLANETA. El Gobierno de Colombia Apuesta por la Digitalizacion de las Aulas. Aula Planeta. URL <http://www.aulaplaneta.com/2015/05/08/noticias-sobre-educacion/el-gobierno-de-colombia-apuesta-por-la-digitalizacion-de-las-aulas/>. 1.1
- [8] MUSA, R. Z. Laboratorios Remotos: Actualidad y Tendencias Futuras. En: Scientia et Technica, 2012, págs. 113–118. 1.1
- [9] COLOMBIA, Renata. Red Nacional Academica de Tecnologia Avanzada. En: Red Nacional Academica de Tecnologia Avanzada, 2010. 1.1, 1.2
- [10] CAICEDO BRAVO, E. B. Laboratorio distribuido con acceso remoto para la ensenanza de la robotica. En: Revista Educacion en Ingenieria, tomo 4, nº 7, 2009, págs. 51–69. 1.1, 1.2

- [11] CARLOS ARGUEDAS MATARRITA, Sonia Beatriz Concari. Hacia un estado del arte de los laboratorios remotos en la enseñanza de la física. En: Revista de Enseñanza de la Física, tomo 27, nº Extra, 2015, págs. 133–139. 1.2, 2
- [12] ISIDRO CALVO, E. Z. Laboratorios remotos y virtuales en enseñanzas técnicas y científicas. En: e Revista de Didáctica, 2012, págs. 12–22. 2
- [13] CULZONI, C. M. EVALUACION DEL DISEÑO DIDÁCTICO DE UNA PROPUESTA PARA EL APRENDIZAJE DE LA FÍSICA UTILIZANDO UN LABORATORIO REMOTO DESDE UN AULA VIRTUAL. En: Revista científica electrónica de Educación y Comunicación en la Sociedad del Conocimiento, tomo 13, nº 2, 2013, págs. 15–21. 2
- [14] ROJAS, M. W. Laboratorios Remotos y Virtuales: Una Herramienta para el Desarrollo de Prácticas en Ingeniería. En: Ciencia, Innovación Y Tecnología, 2014, págs. 71–80. 2
- [15] JUAN CARLOS HENAO LOPEZ, J. A. INTRODUCCIÓN A PHYSILAB. En: Colección Maestros, 2016, págs. 49–57. 2
- [16] CARLOS FERNANDO ARIZA LADINO, D. A. LABORATORIO REMOTO APLICADO A LA EDUCACIÓN A DISTANCIA. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 2008, págs. 131–145. 2
- [17] H. BARCO, P. A. Laboratorios Remotos de Física General en la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. En: Revista de Física, 2007, págs. 28–37. 2
- [18] M. DOMÍNGUEZ, P. R. LABORATORIO REMOTO PARA LA ENSEÑANZA DE LA AUTOMÁTICA EN LA UNIVERSIDAD DE LEÓN. En: REVISTA IBEROAMERICANA DE AUTOMÁTICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL, , nº 36-45, 2005. 2
- [19] BRITOS, Daniel, *et al.* Laboratorio remoto virtual para la enseñanza de administración de redes. En: , 2014. 2
- [20] MARCHISIO, Susana Teresa, *et al.* Uso compartido de módulos educativos para circuitos eléctricos y electrónicos del laboratorio remoto VISIR. En: 7mo Seminario Internacional de la RUEDA"(Red Universitaria de Educación a Distancia de Argentina), 2016. 2



- [21] UTP. Reconocimiento automático de actividades física humanas en sistemas multimodales. UTP. 3.1
- [22] PALL S ARENY, Ramón. Sensores y acondicionamiento de señal. En: Barcelona: Marcombo, 1994. 3.2
- [23] SERWAY, Raymond A; JEWETT, John W y GONZÁLEZ, Sergio R Cervantes. Física para ciencias e ingeniería. Vol. 1 . CENGAGE Learning, 2015. 3.3.1, 3.3.3, 3.4, 4.1, 4.2
- [24] YOUNG, H, *et al.* Física universitaria, vol. 1. En: Naucalpan de Juárez-Mexico: Pearson Educación de México, SA, 2009. 3.3.2
- [25] GROSSMAN, Stanley I. Algebra lineal. McGraw-hill, 1996. 3.5
- [26] SPIEGEL, RM. otros.(2001). Probabilidad y Estadística. Editorial Schaum. Graw-Hill, 1993. 3.6
- [27] ATMEL. MEGA2560 Datasheet. ATMEL. 5.1.3, 8.1